引用格式：石垚，李会泉，陈少华，等．城市多源固废协同利用与区域绿色循环发展研究——以东莞海心沙国家资源循环利用示范基地为例．中国科学院院刊，2023，38(12)：1804-1817，doi：10.16418/j.issn.1000-3045.20230926002.
Shi Y, Li H Q, Chen S H, et al. Synergism utilization of urban multi-source solid waste and district green recycling development—Taking Dongguan Haixinsha National Resource Recycling Demonstration Base as an example. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(12): 1804-1817, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20230926002. (in Chinese)

城市多源固废协同利用与区域绿色循环发展研究

——以东莞海心沙国家资源循环利用示范基地为例

石 垚[1,2]　李会泉[1,2,3*]　陈少华[4]　陈伟强[4]　熊彩虹[5]　李松庚[1,3]　汪 印[4]　钱 鹏[1]　李双德[1]
华 超[1,2]　陆 平[1,2]　刘宇鹏[4]　张晨牧[1,2]　褚建文[1,2]　卢 新[4]

1 中国科学院过程工程研究所　中国科学院绿色过程与工程重点实验室　北京　100190
2 战略金属资源绿色循环利用国家工程研究中心　北京　100190
3 中国科学院大学　化学工程学院　北京　100049
4 中国科学院城市环境研究所 中国科学院城市固体废弃物资源化技术工程实验室/
中国科学院污染物转化重点实验室　厦门　361021
5 广东东实环境股份有限公司　东莞 412007

摘要　固体废弃物长期堆存和粗放处置利用造成严重的水-土-气复合污染，加强固体废弃物的科学有效利用，不仅利于解决我国固废重大污染问题，还能缓解我国资源能源短缺困境。文章梳理了3种典型类别的城市固废综合处理经验模式，指出以集中化、资源化、绿色化为特征的固废循环经济处置利用模式是解决我国固废复杂问题的主要途径，因此急需系统地开展城市多源固废协同利用模式下的关键技术、装备，以及资源能源环境系统集成优化控制研究。以东莞海心沙国家资源循环利用示范基地发展实践为例，阐述了通过突破垃圾焚烧、餐厨制沼、市政污泥热解、电子污泥熔炼、废矿物油蒸馏、全过程代谢模拟数字孪生等一系列城市多源固废资源能源协同清洁高效回收与智能管控关键技术，大幅提升了基地的资源能源综合回收效率，降低了区域环境综合影响水平，真正实现了粤港澳大湾区典型城市多源固废的资源能源耦合高效利用和环境友好型发展。最后，从固废精细化管理、循环发展模式创新、无废社会建设等方面展望了城市多源固废综合利用与

*通信作者
资助项目：中国科学院战略性先导科技专项（A类）（XDA23030300），国家重点研发计划（2020YFC1908905）
修改稿收到日期：2023年12月6日

减污降碳协同发展的重点方向。

关键词 城市多源固废，循环经济，无废社会建设，集成优化控制，减污降碳

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.20230926002
CSTR 32128.14.CASbulletin.20230926002

城市固废污染防治是改善水、大气和土壤环境质量，加强防范环境风险的必然要求，维护人体健康的重要保障。我国城市固废污染防治工作起步晚、基础薄弱、历史欠账多，在城市固废污染防治方面仍存在明显不足，面临的环境风险依然严峻[1]。然而，城市固废中又蕴含着丰富的可回收物质和能量，如果能够清洁高效地加以利用，不仅有利于解决我国城市固废重大污染问题，还是缓解我国资源能源短缺瓶颈的重要突破口[2]。另外，实现城市固废资源的有效回收，既能够提升我国资源循环效率，减少我国经济发展对原生资源的依赖，保障国家资源安全，又能缓解实现碳中和目标可能面临的资源约束问题[3]。习近平总书记多次就发展循环经济、推进城市固废处置利用作出重要批示，党的二十大报告中提出“加快构建废弃物循环利用体系”“积极稳妥推进碳达峰碳中和”等重大战略部署[4]，并强调实施全面节约战略，推进各类资源节约集约利用。因此，开展废弃物资源综合利用是我国深入实施可持续发展战略、建立健全绿色低碳循环发展经济体系、实现碳达峰、碳中和（以下简称“双碳”）目标的重要途径之一。

目前，我国城市固废来源广、数量大、种类多，其综合处置模式多以分散化、单一化为主。在该模式下，一方面各城市固废处置单元之间很难通过物质、能量代谢的协同实现资源能源效率的最优，另一方面也不利于各管理部门对城市固废处置全生命周期实施精细化的监管。美国、日本、欧盟等发达国家和地区通过系统部署新一轮循环经济行动计划，通过数字、生物、能源、材料等前沿技术深度融合，以及重构知识产权与标准体系，形成了一批处于垄断地位的循环经济核心技术和装备[5,6]。我国循环经济总体技术与工艺研究已经整体接近、部分达到国际先进水平，但全过程源头减量减害、高质量循环利用方面仍然差距较大。因此，本文在系统梳理我国城市固废综合处置方式及其存在的问题，尤其是“双碳”背景下所面临的重大挑战基础上，依托中国科学院战略性先导科技专项（A类）“美丽中国生态文明建设科技工程”（以下简称“美丽中国专项”）等支持，提出并构建了以集中化、资源化、绿色化、智慧化为特征的城市多源固废循环经济处置模式；并以位于粤港澳大湾区唯一的国家级资源循环利用基地——东莞海心沙国家资源循环利用示范基地（以下简称“海心沙基地”）建设为例，阐述了在整合现有生活垃圾焚烧发电、危险废物安全焚烧等项目基础上，如何通过突破焚烧飞灰-餐厨沼渣-市政污泥协同热解碳化、电子污泥-废催化剂-废活性炭协同熔炼金属富集、全过程代谢模拟数字孪生等一系列固废集约化协同处置关键技术、装备及软硬件系统的开发和集成应用，大幅提升示范基地的资源能源综合回收效率和降低区域环境综合影响水平。以此，为我国从根本上解决固废复杂问题、促进无废城市和“双碳”目标的实现，提供新的模式和路径。

1 城市多源固废处置现状、问题及挑战

城市固废有广义和狭义之分，学术界一般采用狭义的概念，即特指人们生活活动中所产生的固体废物（municipal solid waste），主要有居民生活垃圾、商业垃圾和清扫垃圾，以及粪便和污水厂污泥[7]，另外生

活垃圾经分类回收的各种金属、塑料、纸屑等废品也属于此类范畴。而广义的城市固废是指在生产、生活及其他活动过程中产生的丧失原有的利用价值或者虽未丧失利用价值但被抛弃或者放弃的固体、半固体，置于容器中的气态物品物质，以及法律法规规定纳入废物管理的物品物质[8]，一般包括城市生活垃圾、城市建筑垃圾、一般工业固体废物和危险固体废物四大类。工程技术领域一般采用广义的城市固废概念，尤其是针对我国目前“无废城市”“无废社会”的建设目标，需要将城市生活源有机固废、城市矿产类固废、工业源一般和危险废物统筹考虑进行协同处置。

1.1 生活源有机固废的能源化处置

生活源有机固废主要指人类生产生活中产生的厨余垃圾、餐饮垃圾和城市污泥等，具有组分复杂、含水率高、易腐败等特性；有机固废的传统处置方法以填埋和焚烧为主，厌氧发酵等资源能源协同利用技术发展迅速。发达国家在该领域核心技术和装备方面仍处于领先地位，其有机固废处理方面的研究已从传统的减量化、资源化和无害化向深度资源化、智慧化、能源化发展，逐步形成了有机固废生物资源能源化、多种有机固废协同处理和高参数智能发电的综合处理模式[9-12]。

我国已实施了促进生活源有机固废资源回收的策略，以应对快速工业化和城市化带来的资源短缺问题[13,14]，但在其资源能源化利用方面与发达国家相比还存在一定差距。① 我国有机固废焚烧基础研究起步较晚，原始创新能力不足，现有技术主要依靠引进、消化和再创新。经过30年的发展，系统整体运行水平虽已接近国际先进水平，但在发电效率、智能化控制、污染排放等方面仍存在短板。② 我国在厌氧发酵等生活源有机固废资源化利用技术领域，产气率低、气化焦油处置率低、沼气发电效率低等关键问题还未完全解决。例如，国际上大力推广的干发酵技术[15]，我国在稳定性和连续性、产气效率等方面也还存在明显不足。

1.2 城市矿产类固废的资源化处置

城市矿产主要指产生和蕴藏于城市固废中可循环利用的钢铁、金属、塑料和橡胶等资源，其具有显著的经济和环境价值属性[16,17]。发达国家在城市矿产废旧产品智能拆解高端再造、新能源器件综合回收与循环利用、有机-无机复合材料高效环保热解与资源回收等方面取得突破性进展。例如，德国在高铁及航空发动机拆解回收和再制造领域已形成了完整的管理体系和技术保障[18,19]；比利时Umicore公司采用专用竖炉实现了废旧三元锂电进行高效解离[20]；美国东北大学开发的热解油高效回收装置，可生产高值化燃料油[21]。

在国家发展和改革委员会、财政部支持下，我国已建立多个城市矿产示范基地，促进了我国城市矿产类固废资源循环利用体系的建设。但我国仍缺乏废旧产品及零部件高质循环利用的有效途径，与国外数字技术驱动的循环经济差距还十分明显。尤其在报废新能源汽车拆解利用、航空发动机叶片修复、退役动力电池有价金属回收、退役复合器件/材料热解装备智能调控配伍与稳定运行等方面，急需二次资源高温-超高温精炼提质提纯、高纯材料构效精确调控等一些关键技术的研发，以及系统集成优化和先进过程控制能力的提升。

1.3 工业源危险废物的安全化资源化处置

工业源危险废物是指在工业生产活动中排放的废渣、飞灰、粉尘和废有机溶剂等，包含46大类467种，具有种类繁多、成分复杂和环境风险高等特点。工业源危险废物主要以填埋、焚烧和物化等安全化处置方式为主[22]。例如，水泥窑协同处置作为一种典型工业危废资源化技术，在进行水泥熟料生产的同时可实现对危险固废的无害化处置[23]。发达国家在此领域通过构建复杂难用工业固废/危废多产业协同利用模式，实现了资源单一利用向多资源跨行业分质协同、

大规模增值利用的根本性转变。以比利时Umicore公司为代表的熔池协同熔炼技术，可处理几十种电子废弃物，同时回收17种有价金属[20]；美国稀土公司采用膜辅助萃取技术回收钕铁硼等废材，实现稀土综合回收率达95%以上[24]。

经过多年发展，目前我国基本形成了以“共性处置技术为主，大力发展多源固废资源化和协同处置技术”的多种方式并存的格局，基本实现了危险废物规范化和无害化管理。但针对新兴产业危险废物，尤其是含战略金属类危险废物的资源回收技术较为缺失。在城市多源含金属类固/危废物协同冶炼技术、材料、核心部件、高端设备方面，我国与国际先进水平差距明显，不同种类战略性新兴产业废料短流程深度分离—精炼熔炼—产品增值纯化利用是未来主要方向。

1.4 绿色低碳循环体系下的问题挑战

在国家一系列固废资源环境相关政策的引导下，我国目前基本实现了一般固废能源化、资源化和危险废物的无害化处置，降低了固废处理处置过程中带来的环境影响和健康风险。但在城镇化建设加速发展和工业转型快速升级过程中，尤其是在我国绿色循环、减污降碳新政策要求下，远不能实现多源固废综合协同治理与资源高效节约循环利用目标，构建废弃物循环利用体系还存在一些挑战。

（1）协同化处置未形成共识。我国不同类型固体废弃物管理归口不同部门，无法统一统筹协调管理，因此城市多源固废的协同化处置也很难推动落实。另外，由于政府部门针对固废处置行业在宏观调控和市场竞争平衡方面存在一定分歧，多源固废协同化处置也较难形成共识。

（2）管理政策体系有待完善。我国出台了许多固废治理与污染防治相关政策文件，从国家层面已初步形成相对完整的固废管理制度体系。但大多地区尚未结合自身产业特点和环境管理现状，配套出台具有地域适用性及可操作性的固废综合利用和处理处置方案，尤其是“互联网+”等数字化管理制度体系，以及集约化协同链接技术体系建设方面还存在一定缺失。

（3）处置利用能力不平衡。近年来，我国各地陆续建成城市危险废物焚烧、填埋、水泥窑协同等综合性处置项目。从全国总体来看处理能力基本达到饱和，但区域发展的不平衡导致部分地区危废处理能力还存在较大缺口[25]。部分地区，尤其是东部沿海城市化工业化水平较高城市，建成的危险废物综合利用项目因市场不合理竞争，以及跨省转移政策壁垒等问题，无法实现盈利性健康发展。

（4）高值化智能化利用水平低。目前，我国大宗工业固废主要以生产中低端建材产品为主，缺乏先进工艺装备支撑下的固废高值化利用产品转化技术，尤其是含金属类的工业固废；而城市矿产类固废也存在同样的困境，这将成为制约我国未来战略金属资源二次开发利用与安全储备的重要问题。

2 “美丽中国专项”支撑海心沙基地建设

粤港澳大湾区是国家“十三五”期间规划打造的世界级城市群。系统开展粤港澳大湾区多源城市固废高效循环利用和污染协同智能控制，不仅是重点地区固废污染、治理工业转型升级的现实需求，更是服务、支撑我国资源循环利用体系建立的战略需求。基于此，“美丽中国专项”中“粤港澳大湾区城市群生态建设工程与生态系统智能管理示范”项目专门设立了“粤港澳大湾区城市群资源循环利用与绿色发展技术装备集成及示范”课题，以期从大湾区城市固废资源环境属性特点、建设世界级城市群的固废无害化处理处置需求出发，开展生活垃圾等城市有机固废及危险废物的高效高值化转化与污染协同控制等关键共性技术、装备研发，以及区域资源循环利用与污染智能管控整体解决方案设计研究。上述关键共性技术、装备的集成及整体解决方案的成功应用，将为破解垃圾

处置“邻避效应”、明显提高粤港澳大湾区城市资源利用效率等方面提供技术支撑，保障国家对垃圾焚烧飞灰安全处置、新兴金属基危险废物高效清洁资源化利用的严格落实。

海心沙基地占地716亩，总投资约50亿元人民币，综合处理包括生活垃圾、餐厨垃圾、26类危险废弃物共100万吨/年（图1）。自2019年“美丽中国专项”启动以来，“粤港澳大湾区城市群资源循环利用与绿色发展技术装备集成及示范”课题牵头单位中国科学院过程工程研究所，联合中国科学院城市环境研究所围绕基地项目建设实际需求，重点开展了以市政污泥、餐厨沼渣、垃圾焚烧飞灰等为代表的有机固废循环利用，以电子污泥、废矿物油等为代表的城市矿产循环利用，以及城市多源固废循环利用全过程智能监控等关键技术和装备的研发，支撑基地建成13万吨/年电子污泥火法熔炼金属再生、5万吨/年废矿物油资源化再生利用、1万吨/年飞灰-沼渣-污泥协同资源化处理、100万吨/年城市多源固废转化一体化智能管控四大示范工程。以此全面支撑海心沙基地100万吨级城市多源固废资源循环利用集成示范建设，并最终形成适用于粤港澳大湾区城市群，并可向全国推广的多源固废集中化循环利用与绿色发展系统解决方案。

2.1 固废资源能源绿色高效转化

（1）*污泥-沼渣-飞灰协同利用关键技术。*城市污泥的处理与处置是国家环保督察的重点，餐厨垃圾厌氧过程易酸化副产大量需要二次处理的沼渣，以及垃圾焚烧量的持续提高导致了飞灰产量的快速增加。针对以上城市生活源固体废物处置过程产生的问题，本研究在污泥-沼渣-飞灰低碳协同资源化利用方面突破了相关技术瓶颈，取得了一系列技术成果：含水率80%的污泥或沼渣一次性脱水降低到40%以下；餐厨垃圾废油脂的生物塑料（PHA）转化率达到60%以上；电化学强化的污泥/餐厨垃圾水热液微生物厌氧发酵化学需氧量（COD）去除率达到85%以上，沼气中甲烷含量最高达到90%；污泥和沼渣在600℃左右的温度下热分解，得到生物炭固体物质，其中的抗生素被100%去除，重金属稳定固化超过85%，营养元素中的氮、磷、钾约80%被固持在生物炭中；污泥减量化达到90%以上。焚烧飞灰与污泥/沼渣混合水热后固相的热解炭中含氯量小于2.0%、重金属浸出性减少85%、二噁英去除率>99.9%，高温烧结制备出的陶粒满足GB/T 17431.2—2010《轻集料及其试验方法》要求，达到飞灰的全量资源化利用目标（图2a）。该技术在海心沙基地已完成万吨级工业示范应用。

（2）*含铜污泥火法熔炼关键技术。*粤港澳大湾区是我国电子信息产业发展的重要集聚区，金属表面处理、电镀、印刷电路板和电线电缆生产废水处理过程中产生大量的含铜、含镍污泥。本研究通过含铜电子污泥富氧熔炼实验室小试和扩试工艺的大量研究，探明了富氧浓度、熔炼温度等关键工艺参数对冰铜品位和渣相控制的影响机制，实现了含铜污泥富氧侧吹熔炼温度1 200℃—1 350℃、富氧浓度26%—28%条件下，铜回收率比现有普通空气鼓风吹炼工艺提高2%以上，床能力提高28%以上水平（图2b）。该技术及中试装备已应用在海心沙基地火法熔炼车间，支撑了10万吨级含铜污泥富氧熔炼工程的工艺优化验证。

（3）*废弃润滑油/矿物油资源化关键技术。*针对粤港澳大湾区废矿物油回收的全分子蒸馏工艺路线不成熟且设备投资大的问题，本研究开发了废弃润滑油/矿物油资源化核心技术（IPE-Reyoil-Tech），实现了有价组分回收率＞85%，装置正常运行时间较传统工艺提高了50%（图2c）。该技术在海心沙基地已完成5万吨级示范工程应用。

2.2 固废转化过程污染协同治理

固废资源能源转化过程同样会造成较为严重的水、气二次污染问题，区别于传统的污染控制技术，固废转化过程的污染协同治理，一般具有以废治废的

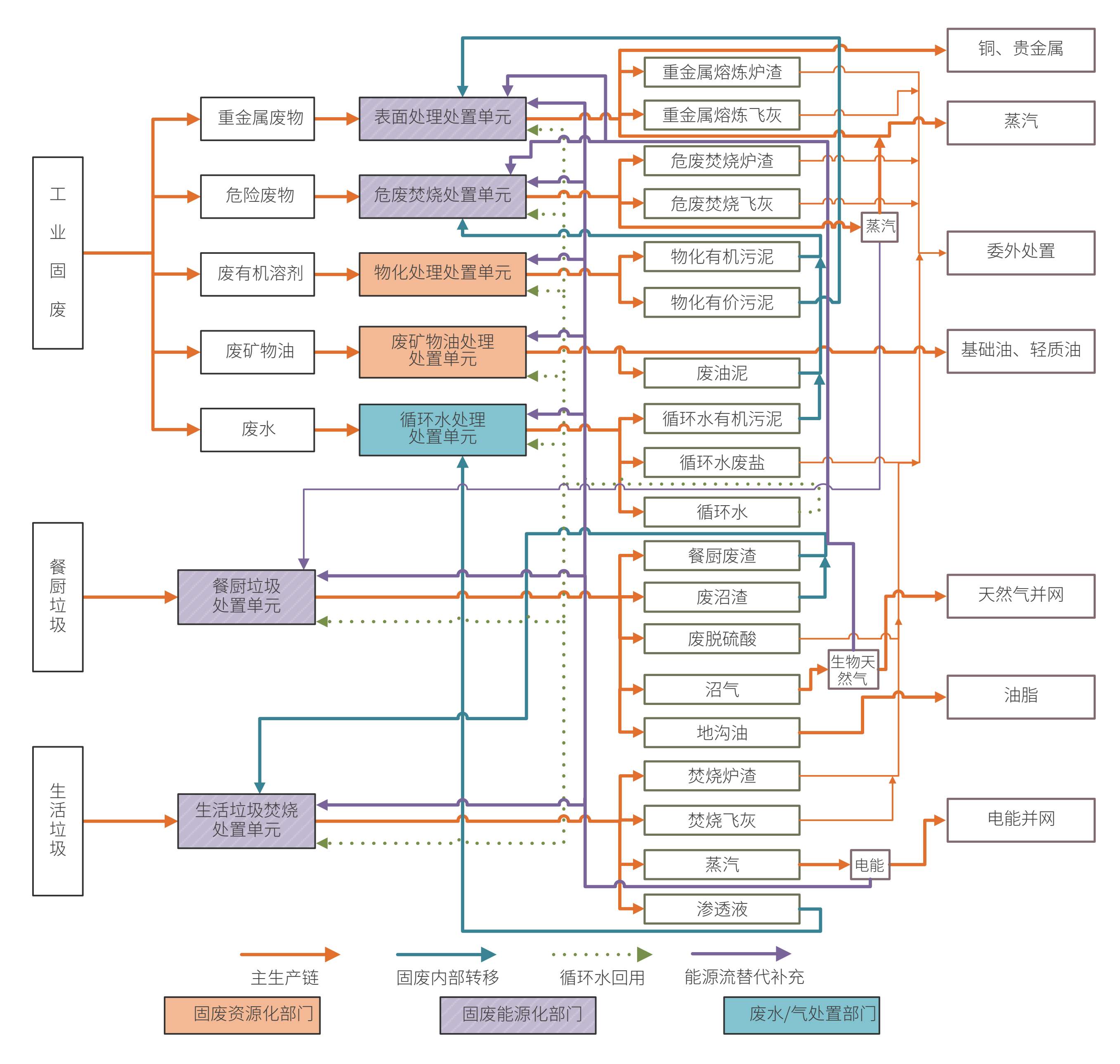


图1 海心沙国家资源循环利用基地产业链图

Figure1 Industrial chain diagram of Haixinsha National Resource Recycling Base

典型特征。

（1）光热催化分散挥发性有机物（VOCS）高效净化关键技术。针对城市多源固废，尤其是含挥发性有机物的危险废物集中处置全过程产生的 VOC_S 高效治理，本研究以 MnO_X、CoO_X、$CoAl_2O_4$ 及贵金属铂（Pt）、钯（Pd）、钌（Ru）等具有催化氧化功能的物质为光致热催化材料的活性组分，从中筛选出具良好 VOC_S 催化降解性能的物质，制备得到整体式光致光热催化剂（图3a）。同时开发了3 000立方米/小时吸附催化耦合间歇净化加热设备，该技术装备集成了电热金属快速升温、金属蜂窝催化剂低阻、高导热且单位体积比表面积大等优势。该技术装备已应用在海心沙基地危险废弃物丙类仓库，并实现稳定运行，总挥发性有机组分净化效率达到≥90%水平。

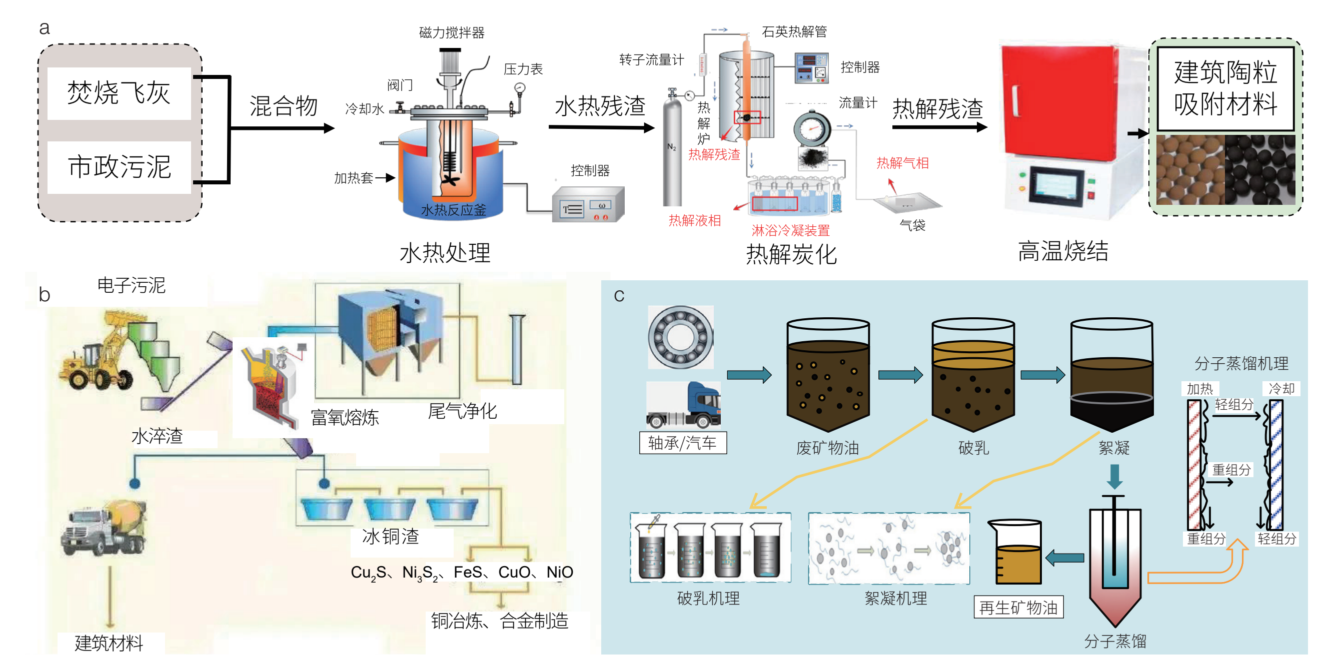


图2　典型城市多源固废资源能源绿色高效转化关键技术

Figure 2　Resources and energy green efficient conversion technologies for typical urban multi-source solid waste

（a）污泥-沼渣-飞灰协同利用关键技术；（b）含铜污泥火法熔炼关键技术；（c）废弃润滑油/矿物油资源化关键技术

(a) Municipal sludge-biogas residue-fly ash collaborative utilization technology; (b) Copper containing sludge pyrometallurgical smelting technology; (c) Waste lubricating/mineral oil recycling technology

（2）生物炭废水深度净化关键技术。固废转化过程中产生的污泥沼渣，经热解生成生物炭吸附剂后，开展吸附处理高盐工业废水技术的研发。本研究自行设计、建设了一套5立方米/天生物炭深度净化废水现场验证评价装置，配备3台相同规格总填装量300千克的活性炭吸附过滤罐。以海心沙基地物化单元产生的高盐污水及其他单元产生的低盐污水混合物为目标废水，开展了污泥基生物炭及商业活性炭的吸附对比评价验证（图3b）。该技术及装备已应用在海心沙基地废水处理车间，实现了入水COD由554毫克/升降至356毫克/升，COD脱除能力达到商业活性炭的75%，表现出优异的多种污染物协同脱除效果。

2.3 全过程资源能源环境智能管控

（1）固废高毒害组分X射线荧光光谱在线检测（在线XRF）技术。粤港澳大湾区多金属渣尘泥类固废年产生量近300万吨，综合利用率不足40%，资源循环利用潜力大，而资源转化过程关键组分在线监测与数字化管控技术的突破是实现其清洁高效循环利用的关键。基于此，本研究突破了固废标准样品原位高均匀自动制备、关键元素光谱自动滤波校准、径向基函数（RBF）自适应神经网络精准定量等关键技术，研制了适用于工业多场景的“样品取样—预处理—检测分析—精准定量”全自动一体化固体物料高精度在线快速检测分析仪器装备，实现了复杂相态物料在线XRF检测新装置在海心沙基地现场的首台套应用，检测精度与国家环境保护标准HJ 781—2016《固体废物22种金属元素的测定电感耦合等离子体发射光谱法》方法对比达到92%以上水平，检测频率达到3次/小时（图4a）。该技术装备已安装在海心沙基地含铜污泥火法熔炼示范工程现场并连续运行，并通过与分散控制系统（DCS）的集成，为富氧侧吹炉的稳定运行和智能配伍提供了重要工艺参数支撑。

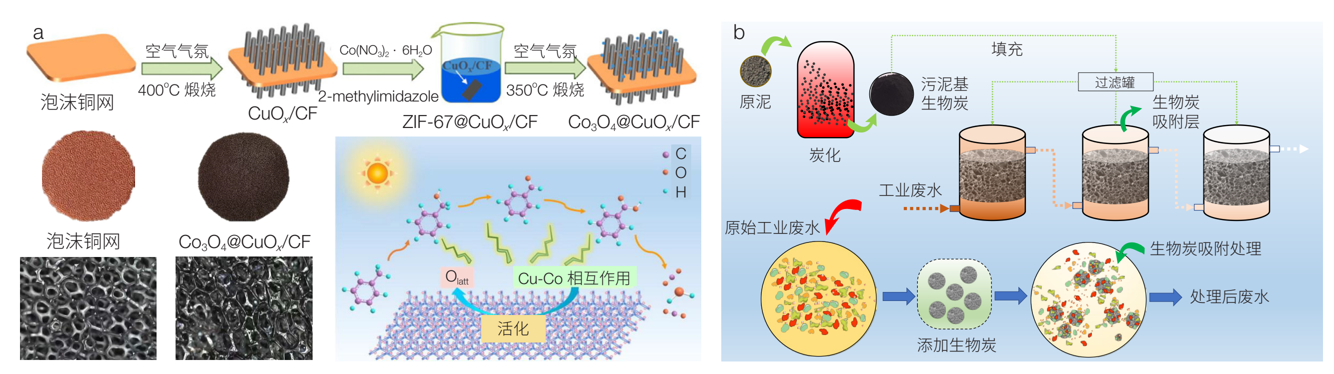


图3　典型城市多源固废资源能源转化过程污染协同治理关键技术

Figure 3　Resources and energy conversion and pollution collaborative control technologies for typical urban multi-source solid waste

（a）光热催化VOC_S高效净化关键技术；（b）生物炭废水深度净化关键技术

(a) Photothermal catalytic VOC_S purification technology; (b) Pyrolysis biocha for wastewater deep purification technology

（2）城市多源固废资源能源环境转化一体化智能管控技术。本研究针对固废资源能源转化效率低、智能管理时效性差等问题，基于大数据迭代挖掘分析的物质能量代谢模拟算法，实现关键物质、能量、元素流股的流向、流量动态模拟预测，数据运算频次>10分钟/次（图4b）。与此同时，开发了城市多源固废资源能源环境转化一体化智能管控系统，实现了多源城市固废物料转化的实时动态模拟、关键资源环境元素全过程跟踪等应用功能部署与建设。并在海心沙基地建成了100万吨/年城市多源固废资源能源环境转化一体化智能管控平台示范工程。

2.4 固废代谢效率综合分析评价

根据城市多源固废处置系统代谢结构，结合国内外传统固废处置模式，以及“美丽中国专项”成果在海心沙基地实施前后各单元实际处置情况，将城市多源固废处置模式分成3种情景；从物质流分析及投入

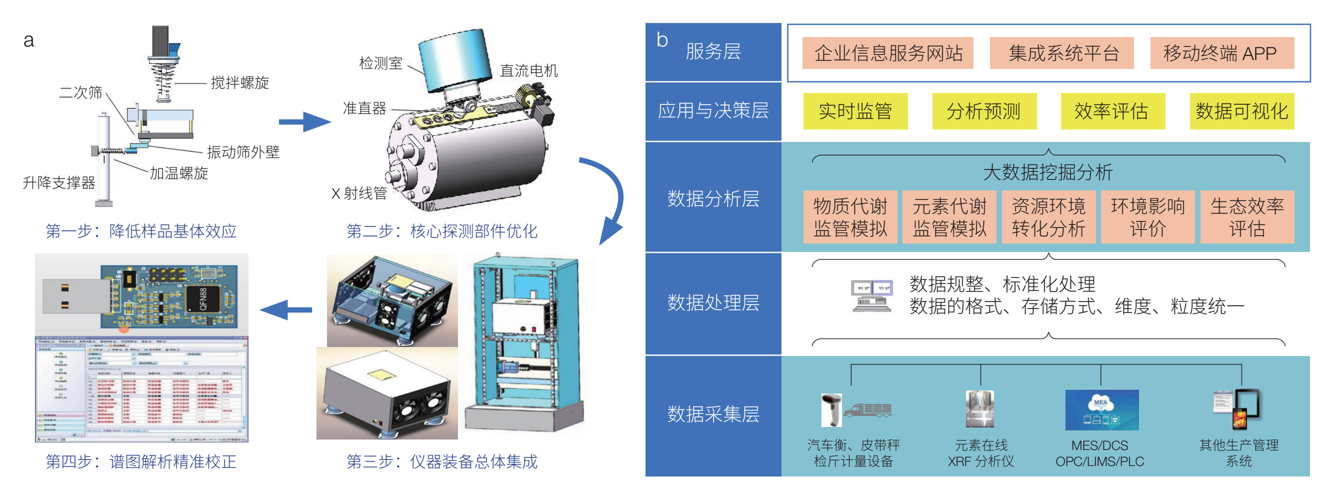


图4　城市多源固废资源能源环境转化一体化智能管控关键技术

Figure 4　Resources energy and environment integrated intelligent control technologies for urban multi-source solid waste conversion

（a）固废组分在线XRF检测技术；（b）城市多源固废资源能源环境转化一体化智能管控技术

(a) XRF online detection technology for solid waste component; (b) Integrated intelligent control technology for urban multi-source solid waste

产出理论视角出发，结合全生命周期评价（LCA）和能量守恒定律构建了相应的分析框架及其评价指标体系，并借助Simapro和Matlab软件，从资源利用、环境影响和能量效率角度对其进行了多维绩效评价[26]。其中，固废单独处置情景，即我国大多城市多源固废传统的单一处置模式；固废物质协同处置情景，即本研究项目实施前海心沙基地的城市多源固废处置模式；固废物质能量耦合协同情景，即本研究项目实施后海心沙基地的城市多源固废处置模式（图5）。

从资源效率来看，固废协同处置和物质能量耦合处置模式下，单位资源化产品固废处置量较固废单独处置模式降低了36.8%，即资源转化效率得到了大幅提高；但固废协同处置模式下的资源消耗负担也明显加大，其单位处置固废辅料消耗和水耗分别增加了25.4%和23.9%；而固废物质能量耦合处置模式在协同处置模式基础上进行了资源能源的替代补充，系统整体能源、辅料及水的消耗又显著降低。

从环境影响来看，尽管固废协同处置和物质能量耦合处置模式，一般污染物排放总量较独立处置模式升高了10.5%，二噁英类排放量也升高了5.4%；但重金属污染排放量确呈明显的递减趋势，递减率达到11.5%，并且镍（Ni）、锌（Zn）、铬（Cr）的递减占比最高，占总量的34.9%、53.6%、6.7%。

从能源效率来看，不同固废处置模式的总体能源消耗强度均未超过1，但固废物质能量耦合处置模式下的能源消耗强度最低，较单独处置和协同处置模式分别低11.5%和16.2%；而固废协同处置模式下的能源产出率最高，比单独处置和物质能量耦合处置模式分别高17.4%和8.0%。另外，尽管固废物质能量耦合处置模式下的能量循环利用率比协同处置模式还高47.3%，但也仅达到12.2%的水平，这说明低温烟气及废水余热的利用仍是海心沙基地下一步能源系统优化提升的重要着力点。

3 城市多源固废处置的绿色循环发展路径和对策建议

3.1 加强城市多源固废处置全生命周期精细化管理，达成多源固废集约化协同处置共识

（1）全面调研固废产排与转运处置管理现状，构建多源固废“源-流-汇”全生命周期一体化精细化智慧监管平台。全面收集包括固废产生量、分类情况、收集转运与处置设施等关键信息，建立由大数据、人

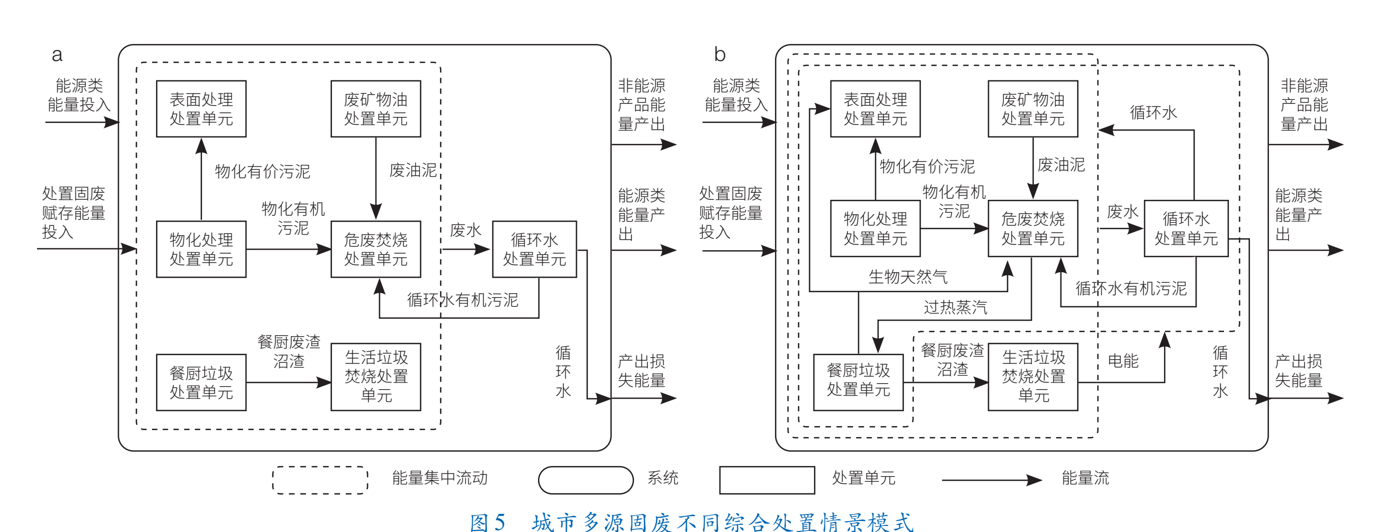


图5 城市多源固废不同综合处置情景模式

Figure5 Different scenarios of comprehensive disposal of urban multi-source solid waste

（a）固废物质协同情景；（b）固废物质能量耦合协同情景

(a) Material synergy treatment (MST); (b) Material energy co-synergy treatment (MEST)

工智能和地理信息系统技术作为支撑，具备标准化的固废数据采集和管理业务流程与优化数据共享机制的智慧决策平台，以提高政府部门监管效率，实现多源固废从产存源头、转运流程，到汇集处置过程的全流程精细化管理和监控。

（2）基于多源固废物质能量代谢循环理论，指导城市固废综合处置设施建设规划，形成多源固废集约化协同处置共识。构建城市多源固废物质能量代谢循环模型，通过不同的固废协同处置情景设置，制定科学合理的固废处置设施和布局规划，确保设施的容量和处理能力与固废产排需求相匹配；由相关政府部门与企业联合设立特定部门统一进行统筹协调管理，推动相关产业的发展和协同合作，从根本上解决城市多源固废统筹管理难、处置效率低等难题。

3.2 加强难处置、难利用固废资源化关键技术的突破和创新，提升高值化智能化利用水平

（1）突破难降解、难分离固废资源能源清洁化回收利用技术，提升高值化绿色化利用水平，实现减碳增能。针对结构复杂或难降解的固废，鼓励基于生物降解、低温热解、催化转化、矿相分离、微气泡强化等固废高效清洁资源化和能源化利用新技术开发和推广应用，实现有机类固废循环利用的减碳增能，以及城市矿产类、高价值危废类固废向高端化产品的循环利用转化。

（2）突破固废多属性快速识别与在线检测技术，提升全过程智能化分析与数字化治理能力。鼓励固废组分热值原位在线监测、大数据挖掘、智能配伍等先进计划排产和先进过程控制新技术开发和推广应用，构架多目标效率评估优化模型，及时监测固废资源化全生命周期过程中的资源能源利用效率和环境污染排放水平，促进城市多源固废智能化利用水平的提升。

3.3 关注多源固废协同处置过程中资源-能源-环境效率的耦合优化和集成管理

（1）关注固废多维属性，耦合资源-能源-环境多目标优化复合生态效率。采取园区跨产业协同利用方式开展多源固废综合处置，有效回收固体废物及其处置过程中产生的废水、废气中的其他有用物质和能量，实现资源-能源效率和环境污染控制的耦合优化提升。最大程度地提取和利用废物资源价值，降低资源能源消耗浪费及环境影响，从多源固废协同处置资源-能源-环境多目标优化角度，合理规划园区物质能量系统的结构和布局，提高物质能源供应的可靠性。

（2）注重环境保护措施，减少二次污染排放，增强多源固废协同处置系统耦合优化和集成管理。注重资源-能源-环境效率，从全生命周期角度出发，加强对固废运输、储存、处置的全过程进行一体化管理，包括采用先进的固废运输与存储技术和装备，有效减少固废及其污染物泄露对环境的潜在负面影响，在确保处置过程环境安全的前提下促进资源-能源效率的有效提升。另外，从设备、工艺、系统不同层次，针对其资源能源转化过程、二次污染排放尤其是碳排放进行动态监测评估和集成优化，通过建立多目标规划、多决策参与耦合模型，优化固废协同处理的整体流程和运行方式，确保资源-能源-环境的协调性和经济性。

3.4 加强与无废城市、无废社会建设目标的有效融合与完善固废政策管理体系

（1）完善城市多源固废处置-废旧资源回收与管理体系。依托“无废城市”建设实施方案，建立完善的城市多源固废处置-废旧资源回收体系。坚持多源固废协同处置的循环经济发展理念，基于物联网技术建立回收网络，提供智能化的回收服务；加强垃圾分类及环境教育等工作以提高回收效率，将废旧资源转化为可再生资源。最终减少固废排放，实现资源的循环利用，促进“无废城市”建设。

（2）通过多源固废循环利用途径开展固废处置过程的环境影响分析，完善固废治理与污染防治体系。开发城市固废多元化循环利用途径，实现废物资源化、能源化和循环利用。注重城市固废处理过程中的

环境保护与居民健康保障，基于现有排放标准进行城市固废处置过程的环境影响评估和实时通报，减少城市固废处理对环境与社会的负面影响。

参考文献

1 刘建勋. 我国固废处理行业市场现状与发展趋势分析. 资源再生, 2019, (5): 34-36.
Liu J X. Analysis of market status and development trend of China's solid waste treatment industry. Resource Recycling, 2019, (5): 34-36. (in Chinese)

2 杜祥琬. 固废资源化利用是高质量发展的要素. 人民论坛, 2022, (9): 6-8.
Du X W. Resource utilization of solid waste is the key factor of high-quality development. People's Tribune, 2022, (9): 6-8. (in Chinese)

3 魏文栋, 陈竹君, 耿涌, 等. 循环经济助推碳中和的路径和对策建议. 中国科学院院刊, 2021, 36(9): 1030-1038.
Wei W D, Chen Z J, Geng Y, et al. Toward carbon neutrality: Circular economy approach and policy implications. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2021, 36(9):1030-1038. (in Chinese)

4 习近平. 高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告. 人民日报, 2022-10-26(01).
Xi J P. Hold high the great banner of socialism with Chinese characteristics and strive in unity to build a modern socialist country in all respects—Report to the 20th National Congress of the Communist Party of China. People's Daily, 2022-10-26(01). (in Chinese)

5 OECD. Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences. Paris: OECD Publishing, 2019.

6 Commission European. The European Green Deal. Strasbourg: European Commission Publishing, 2019.

7 李国学. 固体废物处理与资源化. 北京: 中国环境科学出版社, 2005: 5-13.
Li G X. Solid Waste Treatment and Recycling. Beijing: China Environmental Science Press, 2005: 5-13. (in Chinese)

8 蒋建国. 固体废物处置与资源化. 北京: 化学工业出版社, 2008: 2-7.
Jiang J G. Solid Waste Disposal and Recycling. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 2-7. (in Chinese)

9 杨东海, 华煜, 武博然, 等. 双碳背景下有机固废资源化处理处置技术发展思考. 环境工程, 2022, 40(12):1-8.
Yang D H, Hua Y, Wu B R, et al. Consideration on development of organic solid waste resource treatment and disposal technology under the background of double carbon. Environmental Engineering, 2022, 40(12):1-8. (in Chinese)

10 Grootscholten T I M, Strik D P B T B, Steinbusch K J J, et al. Two-stage medium chain fatty acid (MCFA) production from municipal solid waste and ethanol. Applied Energy, 2014, 116: 223-229.

11 Quina M J, Bordado J M, Quinta-Ferreira R M. Recycling of air pollution control residues from municipal solid waste incineration into lightweight aggregates. Waste Management, 2014, 34(2): 430-438.

12 Dahlan A V, Kitamura H, Tian Y, et al. Heterogeneities of fly ash particles generated from a fluidized bed combustor of municipal solid waste incineration. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2020, 22(3): 836-850.

13 Mo H P, Wen Z G, Chen J N, et al. China's recyclable resources recycling system and policy: A case study in Suzhou. Resources, Conservation and Recycling, 2009, 53 (7): 409-419.

14 Chu J W, Cai Y P, Li C H, et al. Dynamic flows of polyethylene terephthalate (PET) plastic in China. Waste Management, 2021, 124: 273-282.

15 Czubaszek R, Wysocka-Czubaszek A, Wichtmann W, et al. Specific methane yield of wetland biomass in dry and wet fermentation technologies. Energies, 2021, 14(24): 8373-8373.

16 舒元锋, 魏上津, 张祎, 等. 城市矿产资源化利用技术的现状及展望. 选煤技术, 2019, (1): 53-57.
Shu Y F, Wei S J, Zhang Y, et al. Present status and prospect of the urban mineral resources utilization technology. Coal Preparation Technology, 2019, (1): 53-57. (in Chinese)

17 卢庆亮. 城市矿产及其在我国的发展现状. 现代制造技术与装备, 2019, (11): 196-197.
Lu Q L. "Urban Mineral Resources" and its current situation

of development in China. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2019, (11): 196-197. (in Chinese)

18 赵云松, 张迈, 戴建伟, 等. 航空发动机涡轮叶片热障涂层研究进展. 材料导报, 2023, 37(6): 73-79.

Zhao Y S, Zhang M, Dai J W, et al. Research progress of thermal barrier coatings for aeroengine turbine blades. Materials Reports, 2023, 37(6): 73-79. (in Chinese)

19 Louvis E, Fox P, Sutcliffe C J. Selective laser melting of aluminium components. Journal of Materials Processing Technology, 2011, 211(2): 275-284.

20 Pranolo Y, Zhang W, Cheng C Y. Recovery of metals from spent lithium-ion battery leach solutions with a mixed solvent extractant system. Hydrometallurgy, 2010, 102(1-4): 37-42.

21 邓京波. 壳牌公司在新加坡建造热解油升级装置以将废塑料转化为化学品. 石油炼制与化工, 2022, 53(3): 109.

Deng J B. Shell builds a pyrolysis oil upgrading device in Singapore to convert waste plastics into chemicals. Petroleum Processing and Petrochemicals, 2022, 53(3): 109. (in Chinese)

22 刘宏博, 吴昊, 田书磊, 等. "十四五"时期危险废物污染防治思路探讨. 中国环境管理, 2020, 12(4): 56-61.

Liu H B, Wu H, Tian S L, et al. Discussion on the idea of prevention and control of hazardous waste pollution in the 14th Five-Year Plan period. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(4): 56-61. (in Chinese)

23 李静, 潘永刚, 孙书晶, 等. 危险废物资源化利用路径探析. 资源再生, 2022, (6): 14-18.

Li J, Pan Y G, Sun S J, et al. Analysis on the path of hazardous waste resource utilization. Resource Recycling, 2022, (6): 14-18. (in Chinese)

24 于佳欣. 美国稀土公司签订稀土循环利用和萃取分离技术使用协议. 稀土信息, 2015, (8): 22.

Yu J X. U.S. Rare Earth Company Signs Agreement on the Use of Rare Earth Recycling and Extraction Separation Technology. Rare Earth Information, 2015, (8): 22. (in Chinese)

25 孙贝丽, 张路路, 吴乐兰, 等. 基于"无废城市"建设背景下的粤港澳大湾区危险废物管理策略研究. 环境生态学, 2023, 5(4): 102-106.

Sun B L, Zhang L L, Wu L L, et al. Research on hazardous waste management strategies of Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area based on the background of "Zero-Waste Cities" construction. Environmental Ecology, 2023, 5(4): 102-106. (in Chinese)

26 李啸, 石垚, 金炳界, 等. 粤港澳大湾区典型固废综合处置园区能量代谢特征研究. 环境科学学报, 2022, 42(12): 481-494.

Li X, Shi Y, Jin B J, et al. Research on energy metabolism for the comprehensive solid waste disposal park in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area. Acta Scientiae Circumstantiae, 2022, 42(12): 481-494. (in Chinese)

Synergism utilization of urban multi-source solid waste and district green recycling development

—Taking Dongguan Haixinsha National Resource Recycling Demonstration Base as an example

SHI Yao[1,2] LI Huiquan[1,2,3*] CHEN Shaohua[4] CHEN Weiqiang[4] XIONG Caihong[5] LI Songgeng[1,3] WANG Yin[4]
QIAN Peng[1] LI Shuangde[1] HUA Chao[1,2] LU Ping[1,2] LIU Yupeng[4] ZHANG Chenmu[1,2] CHU Jianwen[1,2] LU Xin[4]
（1 CAS Key Laboratory of Green Process and Engineering, Institutes of Process Engineering,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2 National Engineering Research Center of Green Recycling for Strategic Metal Resources, Beijing 100190, China;
3 School of Chemical Engineering, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
4 CAS Engineering Laboratory for Recycling Technology of Municipal Solid Wastes /
CAS Key Laboratory of Urban Pollutant Conversion, Institute of Urban Environment,
Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China;
5 Guangdong Dongshi Environment Co. Ltd., Dongguan 412007, China）

Abstract The long-term storage and extensive disposal of solid waste have caused serious water soil air composite pollution. It is necessary to strengthen the scientific and effective utilization of solid waste, which is not only conducive to solving the major pollution problem of solid waste, but also alleviates the shortage of resources and energy in China. This study summarizes three typical types of urban solid waste comprehensive treatment experience models, and points out that the solid waste circular economy model characterized by centralization, resource utilization, and greening is the main way to solve the complex problem of solid waste. Therefore, it is urgent to systematically carry out research on key technologies, equipment, and integrated optimization control of resource, energy, and environmental systems under the urban multi-source solid waste collaborative utilization model. Taking the development practice of Haixinsha National Resource Recycling Base as an example, by breaking through a series of key technologies such as domestic waste incineration, food waste biogas producing, municipal sludge pyrolysis, electronic sludge smelting, waste mineral oil distillation, and whole process metabolism digital twin, this study expounds that the comprehensive resource and energy recovery efficiency has been greatly improved, and the comprehensive environmental impact level has been greatly reduced. Finally, the key directions of multi-source solid waste comprehensive utilization and pollution collaborative control are prospected from the aspects of precise management of solid waste, innovation of circular economy development mode, and construction of waste free society.

Keywords urban multi-source solid waste, circular economy, waste free society construction, integrated and optimized control, reduce pollution and carbon emissions

石 垚 中国科学院过程工程研究所副研究员。主要研究领域：物质代谢理论及其在循环经济智能控制领域关键技术的研发与应用研究。E-mail: yaoshi@ipe.ac.cn

*Corresponding author

SHI Yao Ph. D. in industrial ecology, Associate Professor of Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences (CAS). His research focuses on material metabolism theory and key technologies, and its application in the field of intelligent control of circular economy. E-mail: yaoshi@ipe.ac.cn

李会泉 中国科学院过程工程研究所研究员，中国科学院大学岗位教授，战略金属资源绿色循环利用国家工程研究中心主任。主要研究领域：战略金属资源清洁循环利用与减污降碳绿色过程研究。E-mail: hqli@ipe.ac.cn

LI Huiquan Ph.D. in chemical engineering, Professor of Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences (CAS), Post Professor of University of Chinese Academy of Sciences, Director of the National Engineering Research Center for Green Recycling of Strategic Metal Resources. His research focuses on reduction of pollution and carbon emissions green processes for strategic metal resource clean recycling. E-mail: hqli@ipe.ac.cn

■责任编辑：岳凌生